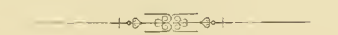
Die Grundlagen der Photometrie

von

Dr. Hugo Krüss.





Die Grundlagen der Photometrie

von

Dr. Hugo Krüss.

Die elektrische Beleuchtung nimmt in immer grösseren Umfange den Wettstreit auf mit den bisher üblichen Beleuchtungsarten durch Verbrennen von Gas, Oel und Kerzen. Ueberall, wo in diesem Kampfe eine Entscheidung getroffen werden, wo also die Grösse der Leistungen der verschiedenen Lichtquellen ziffermässig ermittelt werden soll, sind photometrische Messungen erforderlich. In Folge dessen hat sich auch die 3. Section des Congresses der Elektriker in Paris im September 1881, welcher die Frage der elektrischen Beleuchtung zugetheilt worden war, vor Allem über die geeigneten photometrischen Methoden Klarheit verschaffen müssen. Hierbei hat sich herausgestellt, dass die Meinungen der Mitglieder dieser Section über diesen scheinbar so einfachen Punkt sehr auseinander gingen; man hat sich nicht über die eine oder die andere Methode einigen können und deshalb die weitere Bearbeitung dieser Frage einer internationalen Commission übergeben mit der Directive, einheitliche Normen für photometrische Messungen aufzustellen, hauptsächlich für diejenige des elektrischen Lichtes.

Es fehlen bisher geeignete Normallichtquellen von genügender Constanz, es fehlen Methoden der Vergleichung, welche von allen Seiten Anklang finden. Dagegen hört man vielfach die Klage, dass man die Genauigkeit photometrischer Messungen von dem Urtheil abhängig machen müsse, welches man mit dem Auge, »einem so unvollkommenen und unempfindlichen Instrumente«, habe und daran schliessen sich die vielen Versuche, bei photometrischen Bestimmungen den physiologischen Vorgang im Auge durch einen physikalischen oder chemischen Process ersetzen zu wollen. Gerade diese Versuche haben viel zur Verwirrung in der so einfachen Frage beigetragen. Das Auge ist schlechterdings nicht zu entbehren bei Helligkeitsbestimmungen, es entbehren zu wollen ist eine Verirrung. Die Wahrheit dieser Behauptung ist leicht einzusehen, wenn man sich die Bedeutung der Begriffe »Leuchten«, »Licht«, »Helligkeit« klar macht. Will man überhaupt fortschreiten in einer Wissenschaft, so darf über die Grundbegriffe derselben, über ihre Grundlagen, keine Unklarheit mehr herrschen; diese in Bezug auf die Photometrie zu zerstreuen, ist der Zweck der nachfolgenden Erörterungen.

I.

Nach der Undulationstheorie besteht das Licht in der Fortpflanzung oscilatorischer Bewegungen der kleinsten Theile eines hypothetischen Mittels, des Aethers.

Die qualitative Verschiedenheit dieser Bewegungen wird hervorgerufen durch die verschiedene Dauer der Oscilationen. Da die Fortpflanzungsgeschwindigkeit der Aetherschwingungen dieselbe ist für Oscillationen von grosser oder von kleiner Dauer, so resultirt hieraus, dass die Wellenlängen der Schwingungen von verschiedener Dauer verschieden sein müssen. Ferner zeigt die Dioptrik, dass Lichtschwingungen von verschiedenen Wellenlängen eine verschiedene Brechbarkeit besitzen. Dauer der Schwingung, Wellenlänge und Brechbarkeit sind demgemäss qualitative Charaktere des Lichtes.

Die Wellenlänge des Lichtes vermögen wir zu bestimmen durch die bekannten Methoden der Beugungs- oder Interferenz-Beobachtungen, bei welchen zwei Strahlen von verschiedener Länge hergestellt werden, deren Wellenzahlen eine bekannte Differenz gegen einander besitzen. Aus der Länge der von den beiden Lichtstrahlen durchlaufenen Wege und der Grösse der Fortpflanzungsgeschwindigkeit des Lichtes lassen sich dann die Wellenlänge und die Dauer der Schwingung höchst einfach berechnen.

Als Mass der Intensität des Lichtes nimmt man die lebendige Kraft der Aethertheilchen an, welche dem Quadrate der Geschwindigkeit derselben proportional ist. Es lässt sich zeigen, dass sie in Folge dessen auch proportional ist dem Quadrate der Amplitude der Schwingung.

Die quantitative Verschiedenheit der oscilatorischen Bewegung wird demgemäss hervorgerufen durch die verschiedene Grösse der Verschiebung, welche die einzelnen Theile des schwingenden Mittels erleiden. Die Amplitude der Schwingungen ist also ein quantitativer Charakter des Lichtes. Ihre Grösse kann aber nicht wie die Wellenlänge gemessen werden. Um ein Urtheil über die Quantität des Lichtes zu gewinnen, nimmt man an, dass sie proportional sei der Grösse der Wirkungen, welche das Licht ausübt.

Dieser Wirkungen des Lichtes unterscheidet man drei: die thermische, die chemische und die erleuchtende Wirkung.

Früher hat man die Lichtstrahlen selbst nach diesen verschiedenen Wirkungen unterschieden in Wärmestrahlen, in chemisch wirkende und in leuchtende Strahlen und sie sogar ihrer Brechbarkeit nach getrennt, indem man annahm, die Wärmestrahlen seien die mindest brechbaren, die chemisch wirkenden die brechbarsten und den leuchtenden komme eine mittlere Brechbarkeit zu. Es lässt sich aber nachweisen, dass im ganzen Bereiche des sichtbaren Spectrums sowohl eine erwärmende als eine chemische Wirkung der Lichtstrahlen vorhanden ist. Während allerdings bei den gewöhnlich in der Photographie angewendeten Substanzen das Maximum der chemischen Wirksamkeit am brechbarsten Ende des Spectrums liegt, ist bei Anwendung passender Substanzen das Maximum der chemischen Wirkung der Lichtstrahlen sogar

in Roth zu finden. Draper, D. W. Pfeffer und Gerland haben gefunden, dass die Sauerstoffabscheidung aus den grünen Pflanzen am lebhaftesten im gelben und im grünen Lichte erfolge.

Ebenso liegt das Maximum der Wärmewirkung allerdings in Ultraroth, wenn man zur Erzeugung des Spectrums Prismen und Linsen aus Glas verwendet, mit einem Wasserprisma fand Seebeck aber das Maximum der Wärmewirkung in Gelb und Draper's Versuche an einem Beugungsspectrum ergaben die gleiche Wärmemenge in demjenigen Theile des Spectrums, welcher zwischen dem Fraunhofer'schen Linien A und D liegt, wie in demjenigen zwischen den Linien D und H. Mouton kam durch durch sorgfältige Messungen der Vertheilung der Wärme im normalen Spectrum des Sonnenlichtes unter Berücksichtigung der durch die Verschiedenheit der Dispession erzeugten Anomalien zu dem Ergebniss, dass das Maximum der Wärmeintensität beim Sonnenspectrum nicht im ultrarothen Theile, sondern zwischen C und E, also an der hellsten Stelle des Spectrums liege.

Lockyer sagt: »Die Curven, durch welche man die Maxima der Wärme, der der Helligkeit und der chemischen Wirksamkeit in den Lehrbüchern bezeichnet findet, bezeichnen nach meiner Ansicht nichts Anderes als gewissermassen die Absorptionsspectra derjenigen Substanzen, durch welche die Maxima bestimmt wurden — sei es Lampenruss, die Netzhaut des Auges oder ein Silbersalz — und die von der Natur des Lichtes ganz unabhängig sind.«[1]

Es sind demgemäss die verschiedenen Arten der Wirkungen der Lichtstrahlen nicht bestimmte Eigenschaften der Aetherschwingungen, sondern diese verschiedenen Arten der Wirkungen hängen ab von den Eigenschaften derjenigen Körper, welche die Lichtstrahlen aufnehmen. Es giebt nur eine Art von Aetherschwingungen, ein und derselbe Lichtstrahl kann wärmend, chemisch und leuchtend wirken.

Wir sind nun aber nicht berechtigt, aus der Stärke der einen dieser Wirkungen, welche wir etwa bestimmen, auf diejenige der anderen Wirkungen zu schliessen. Hat nämlich ein Lichtstrahl seine Fähigkeit, z. B. eine Wärmewirkung zu verursachen, bereits ausgeübt, indem man ihn etwa durch eine Schicht einer Alaunlösung treten liess, so ist klar, dass die erwärmende Kraft desselben bedeutend kleiner geworden ist, während die leuchtende und die chemisch wirkende fast unverändert geblieben sind. Alle Lichtstrahlen aber mit welchen wir experimentiren, haben durch Absorption in den Medien, welche sie bereits durchlaufen haben, schon wärmend, chemisch oder leuchtend gewirkt, jedoch aller Wahrscheinlichkeit nach diese drei Wirkungen in verschiedenem Masse ausgeübt.

Andererseits hängt aber nicht nur die Art der Wirkung, sondern auch ihre Stärke von den Eigenschaften derjenigen Körper ab, welche die Lichtstrahlen aufnehmen, so dass auch aus diesem Grunde aus der Stärke der ausgeübten chemischen Wirkung etwa nicht geschlossen werden kann auf die Stärke der Wärmewirkung, welcher dieselben Strahlen fähig gewesen sein würden.

[1] Studien zur Spectralanalyse Leipzig 1879 p. 99.

II.

Aus dem Vorhergehenden folgt, dafs wir unter Photometrie, d. h. unter Messung der Quantität der Aetherschwingung, die Bestimmung der Stärke sowohl der wärmenden, wie der chemischen, als auch der leuchtenden Wirkung des Lichtes verſtehen können.

Das hervorragendste Interesse liegt für uns in der Bestimmung der Stärke der leuchtenden Wirkung des Lichtes? Wir verstehen darunter einzig und allein diejenige Wirkung der Lichtstrahlen auf unser Auge, welche zur Ursache einer Gesichtsempfindung für uns wird.

Wir wissen wohl, dass einerseits der Blinde ebenfalls eine Wirkung der Lichtstrahlen in seinem Auge verspüren wird, nämlich die erwärmende, und dass andererseits nach einer Hypothese gerade diejenige Einwirkung der Strahlen auf das Auge, welche die Gesichtsempfindung hervorruft, chemischer Art sein soll. Aber doch nur dann, wenn der durch die Lichtstrahlen in der Substanz der Retina erzeugte Process, sei er nun chemischer, elektrischer oder anderer Natur, die Gesichtsempfindung wirklich zur Folge hat, können wir von einer leuchtenden Wirkung des Lichtes reden.

Um möglichen Missverständnissen vorzubeugen, wollen wir nicht unerwähnt lassen, dass die Aetherschwingung, welche zur Ursache der leuchtenden Wirkung werden kann, natürlich auch dann vorhanden ist, wenn zufällig kein Auge sie empfindet, also etwa im Inneren eines Glühofens oder in der menschenleeren Wüste; die leuchtende Wirkung hängt natürlich nicht davon ab, ob sie wirklich erfahren wird, sondern nur davon, dass es möglich ist, sie zu erfahren.

Die Quantität des Lichtes in Bezug auf seine leuchtende Wirkung bezeichnet man mit dem Worte Helligkeit. Hell bedeutet eigentlich nur viel Licht, wie dunkel wenig Licht bedeutet; in der Physik pflegt man aber stets nur die positiven Bezeichnungen der Quantität als Ausdruck für deren Mass zu benutzen, man spricht z. B. selbst bei Bestimmung der Temperatur der Nordpolgegenden von minus so und so viel Grad Wärme. Wärme und Kälte, Helligkeit und Dunkelheit sind nur relative Begriffe für uns; dieselbe Temperatur unserer Zimmer erscheint uns im Winter warm, im Sommer kühl und die colossale Helligkeit der elektrischen Beleuchtung ist dunkel im Vergleich zu intensivem Sonnenlicht. Sprechen wir also im Folgenden von Helligkeit, so wollen wir wie üblich darunter das Mass der leuchtenden Wirkung der Lichtstrahlen verstehen.

Aus dem bisher Gesagten folgt, dass es allerdings eine physikalische Definition der Intensität der Aetherschwingungen giebt, dass wir dieselbe aber nicht direct messen können wie die Wellenlänge, sondern nur die Stärke der Wirkungen der Aetherschwingungen. Die Art dieser Wirkungen hängt ab von der Substanz, auf welche gewirkt wird. Es findet eine erleuchtende Wirkung statt, wenn sie in unserem Sehorgan eine Gesichtsempfindung zur Folge hat. Hieraus folgt, dass nur das Auge

im Stande ist, Helligkeiten zu messen; die Grösse der Helligkeit kann nur der Stärke der Lichtempfindung im Auge proportional gesetzt werden.

Allerdings wissen wir, dass die Grösse der Lichtempfindung im Auge nicht immer proportional der physikalischen Reizung ist. Wenn die Grösse der Lichtstrahlung auf physikalischem Wege (also etwa durch Entfernung oder Annäherung der Lichtquelle) unter oder über eine gewisse Grenze gebracht wird, so folgt die Stärke der Lichtempfindung nicht in demselben Masse. Diese Thatsache ist aber nach unserer Meinung keineswegs geeignet, angeführt zu werden gegen die Annahme des Auges als oberste Instanz bei Helligkeitsbestimmungen. Denn was eben vom Auge nicht mehr als Helligkeit empfunden wird, kann als solche auch nicht mehr bezeichnet werden. Dieses zeigt sich uns am besten, wenn wir die Sache von der praktischen Seite aus betrachten. Wird eine Lichtquelle so schwach oder wird sie so weit entfernt, dass das menschliche Auge keine Helligkeitsempfindung mehr durch sie empfängt, so herrscht in der That für uns absolute Dunkelheit, wenn auch theoretisch die noch vorhandene Helligkeit als kleine Grösse bestimmbar ist; und wenn andererseits die Lichtempfindung im Auge hervorgerufen durch eine Lichtquelle in 1 Meter Entfernung nicht 10000 Mal so gross ist als diejenige hervorgerufen durch dieselbe Lichtquelle, wenn sie sich in 100 Meter Entfernung befindet, so ist in der That die Helligkeit nicht 10000 Mal so gross. Die Stärke der Ursache ist in diesem Falle allerdings 10000 Mal so gross, die Helligkeit ist aber Wirkung dieser Ursache und braucht deshalb nicht direct proportional derselben zu sein.

Wenn also die Helligkeit einer Lichtquelle von der Lichtempfindung abhängig ist, welche sie im Auge hervorruft, so lässt sich in der That nicht leugnen, dass dadurch eine grosse Unsicherheit in die praktische Bestimmung von Helligkeiten, in die Methode der photometrischen Messungen gebracht wird. Ist das Auge einmal nicht zu entbehren, so hängt die erreichbare Genauigkeit ab von der Empfindlichkeit der Retina des Beobachters und diese ist natürlich individuell verschieden, sie ist sogar bei demselben Individuum Schwankungen unterworfen je nach dem Zustande, in welchem sich der ganze Organismus befindet.

Es ist deshalb begreiflich, dass man immer und immer wieder versucht hat, zum Zwecke der Helligkeitsmessungen die physiologische Wirkung durch eine physikalische oder chemische zu ersetzen, wenn es auch unverzeihlich ist, dass man dabei die richtige Definition des Wortes Helligkeit resp. leuchtende Wirkung des Lichtes stets gänzlich übersah. Dieser Versuche lassen sich eine grosse Anzahl aufführen. Das Zöllner'sche Scalenphotometer benutzt das Princip des Crookes'schen Radiometers, das Siemens'sche Scalenphotometer die Veränderung des Leitungswiderstandes bei Bestrahlung; auf dem im Herbst 1881 in Paris stattgefundenen Congress der Elektriker tauchten bei der Frage der Helligkeitsbestimmung des elektrischen Lichtes eine ganze Reihe derartiger Projecte auf, welche zum Theil von den grössten Gelehrten herrührten, z. B. Becquerel's electrochemisches Aktinometer, bei welchem die Eindrücke des Lichtes auf die Retina ersetzt werden sollen durch die chemische Wirkung des Lichtes auf eine Schicht Chlorsilber. Aber gerade dort zeigte sich in

dieser Beziehung die allergrösste Verwirrung, hervorgerufen durch die falsche Meinung, man müsse das Auge durch eine physikalische Wirkung ersetzen können.

Die Unmöglichkeit dieses Beginnens tritt schon in dem Augenblicke an uns heran, wenn wir entscheiden sollen, ob ein solches physikalisches oder chemisches Photometer wirklich als Mass der Helligkeit benutzt werden kann, ob die auf dasselbe ausgeübte und von demselben angezeigte Wirkung in irgendeinem constanten Verhältniss zur leuchtenden Wirkung der Lichstrahlen stehe. Ueberlegt man sich die Sache richtig, so kann hierüber wiederum nur das Auge allein entscheiden, weil die Grösse der Lichtempfindung in demselben einzig und allein massgebend für die Grösse der Helligkeit ist. Hier liegt am nächsten zu erwiedern, man mache diese Prüfung in der Weise, dass man untersuche, ob das Instrument bei Einwirkung derselben Lichtquelle stets dasselbe Resultat ergebe und ob es ferner z. B. bei Benutzung von vier Kerzen anstatt einer einzigen eine dementsprechend grössere, hier also vier Mal so grosse, Helligkeit erkennen lasse.

Das Bedenkliche des eben angedeuteten Versuches liegt nun darin, dass nur Aetherschwingungen von derselben Wellenlänge engewendet werden, nur Lichtquellen derselben Art, in welchen die Zusammensetzung der Strahlen nach den verschiedenen Theilen des Spectrums dieselbe ist. Man wird aber gewiss nach Vornahme eines solchen Versuches nicht behaupten können, dass ein solches Photometer auch richtige Resultate ergiebt, wenn mit demselben zwei in ihrer Zusammensetzung vollkommen verschiedenartige Lichtquellen in Bezug auf ihre Helligkeit mit einander verglichen werden sollen, wie z. B. ein Gasbrenner und der elektrische Flammenbogen. Denken wir uns als Beispiel für diesen Fall einen der vorgeschlagenen Photometer, welcher auf der chemischen Wirkung des Lichtes auf ein Silbersalz beruht, so wird dieses eine zu grosse Helligkeit für das elektrische Licht ergeben wegen dessen Reichthum an Aetherschwingungen von kurzer Wellenlänge, für welche das Silbersalz empfindlicher ist als für solche von längerer Wellenlänge.

Was von vornherein zu erwarten stand, dass erkennen wir wiederum aus dem Vorhergehenden: dass wir nur mittelst des menschlichen Auges allein im Stande sind, nach Massgabe der Stärke seiner Lichtempfindung auf die Grösse der Helligkeit zu schliessen. Nun wissen wir aber, dass das Auge durchaus nicht im Stande ist, bei zweien von demselben empfundenen Eindrücken, welche von einander verschieden sind, genau anzugeben, in welchem mathematischen Verhältniss die Stärken der Empfindungen zu einander stehen. Es kann nur urtheilen, dass die eine Empfindnng stärker sei als die andere. Dieses könnte uns aber bei photometrischen Messungen nichts nützen. Deshalb müssen alle photometrischen Methoden so eingerichtet sein, dass zwei Empfindungen hervorgerufen werden, welche das Auge als nicht verschieden in ihrer Stärke, sondern als gleich beurtheilt. Es handelt sich also stets um Herstellung gleicher Helligkeiten auf physikalischem Wege, durch Schwächung der helleren Lichtquelle mittelst irgend eines Verfahrens, welches die stattgefundene Schwächung zu berechnen erlaubt.

III.

Ebenso wie man bei Bestimmung der Gesammtintensität einer Lichtquelle dar über geklagt hat, dass man durch Benutzung des Auges zur Messung kein richtiges Urtheil über die wirkliche Helligkeit gewinne, ebenso steht es auch bei der Bestimmung der Intensitätscurve des Spektrums.

Welcher Art auch die Methode einer solchen Bestimmung war, ob man wie Fraunhofer[1] die Helligkeit der einzelnen Theile des Spektrums verglich mit derjenigen einer Normallichtquelle, oder wie Vierordt[2] die Empfindlichkeit des Auges in Bezug auf die Beimischung von reinem Weiss zu einer Spektralfarbe dazu benutzte, immer findet man die Bemerkung, dass man durch solche Methoden keine mechanische Spektralintensitätscurve finde, sondern nur eine physiologische Curve.

Immer und immer wieder wird auch in diesem Falle vergessen, dass Lichtstärke und Helligkeit Begriffe sind, zu deren Definition unbedingt die subjektive Empfindung unseres Sehorgans herbeigezogen werden muss. Es giebt keine objektive Lichtstärke, d. h. keine Lichtstärke ausser uns, unter Nichtberücksichtigung unseres Auges. Es ist Helligkeit etwas Anderes als mechanische Energie der Aetherschwingungen, deshalb kann man nie eine Helligkeitscurve des Spektrums finden, welche objektiven Werth im physikalischen Sinne hat. Andererseits ist man aber auch nicht berechtigt, wie Dietrich[3] solches thut, an Stelle der physiologischen Curve eine mechanische zu setzen, welche auf Untersuchungen des Spektrums mittelst einer Thermosäule beruht, wenn es sich, wie in dem vorliegenden Falle der quantitativen Spektralanalyse um eine Methode handelt, welche auf Helligkeitsmessungen beruht, d. h. auf der mittelst unseres Auges getroffenen Entscheidung, dass zwei gleichzeitig empfundene Helligkeiten einander gleich sind, wenn die Eindrücke auf unser Sehorgan die gleichen sind.

Das Verhältniss der Helligkeiten der verschiedenen Theile des Spektrums zu einander kann also nur vermittelst des Auges bestimmt werden; nur auf diese Weise erlangt man eine Helligkeitscurve des Spektrums; sie muss demgemäss eine physiologische Curve sein, sie ist subjektiv, individuell, sie ist nicht nur bei verschiedenen Personen verschieden, sondern auch bei einem und demselben Individuum zeitlich variabelen Einflüssen unterworfen.

Wird eine solche Untersuchung aber mit Hülfe von Augen gemacht, welche in Bezug auf die Farbenempfindung als normal angesehen werden können, so wird die erlangte Helligkeitscurve des Spektrums auch eine allgemeinere Bedeutung beanspruchen dürfen.

Es gilt aber auch hier vor Allem, an der Nothwendigkeit der Benutzung des Auges zu solchen Bestimmungen festzuhalten und die Sachlage nicht dadurch zu trüben, dass wir fortwährend die Grundbegriffe verwechseln und so die Hoffnung

[1] Denkschriften d. Bayr. Akad. d. Wiss. 1815, p. 195.

[2] Anwendung der Spektralanalyse etc. Tübingen 1871, p. 51.

[3] Die Anwendung des Vierordt'schen Doppelspaltes. Stuttgart 1881, p. 8.

nähren, auf anderem als physiologischen Wege in der vorliegenden Frage zur Erkenntniss zu gelangen. Anderenfalls werden wir anstatt vorwärts zu schreiten, nur die Entwickelung der Wissenschaft aufhalten.

Einen der schwierigsten Punkte der Photometrie haben wir bereits oben berührt, das ist die Vergleichung der Helligkeit zweier Lichtquellen von verschiedener Farbe.

Wir wissen, dass die Stärke der Lichtempfindung eine verschiedene ist für Licht von verschiedener Farbe, von verschiedener Wellenlänge. Gelb und Roth machen den stärksten Eindruck auf das menschliche Auge, weshalb auch die fruhesten Ausdrücke für Farben in den Sprachen der Völker diejenigen für Gelb und Roth sind. »Gelb führt in seiner höchsten Reinheit immer die Natur des Hellen mit sich«[1], »so wie Gelb immer ein Licht mit sich führt, so kann man sagen, dass Blau immer etwas Dunkles mit sich führe«.[2]

»The yellow and orange coulours affect the senses more strongly than all the rest together, and next to these are the red and green. The blue compared with these is a faint and dark colour, and the indigo and violet are much darker and fainter.«[3]

Da wir nun aber bei der Definition des Wortes Lichtstärke, diese nicht proportional der lebendigen Kraft der Aetherschwingungen, sondern nur abhängig von der Grösse der Empfindung in unserem Auge gesetzt haben. so würde diese physiologische (oder physische) Eigenthümlichkeit uns weiter keine Schwierigkeiten bieten können; wir sind vollkommen berechtigt, da das Roth einen stärkeren Eindruck auf unser Auge macht als das Blau, das Roth als heller denn Blau zu bezeichnen.

Ganz so einfach liegt die Sache aber leider nicht. Die Helligkeit d. h. die Empfindungsstärke des Lichtes in unserem Auge ist eine Funktion der lebendigen Kraft der Aetherschwingungen; die Natur dieser Funktion ist uns unbekannt. Aber so viel ist uns bekannt, dass für Licht von verschiedener Wellenlänge die Art dieser Funktion eine verschiedene ist.[4] Experimentell lässt sich dieses dadurch zeigen, dass zwei verschiedenfarbige Lichtquellen, welche wir für gleich hell halten, uns nicht mehr gleich hell erscheinen, wenn man die Intensität beider durch gleichmässiges Nähern oder Entfernen in demselben Verhältniss vermehrt oder vermindert (Purkinje'sches Phänomen). Hieraus folgt unmittelbar, dass ein einheitliches physiologisches Mass für Licht von verschiedener Wellenlänge nicht existirt, dass die Einheiten nach welchen die Helligkeiten verschiedener Farben durch unser Auge gemessen werden, verschiedene sind. Es sind, wie ich dieses schon früher einmal hervorgehoben habe,[5] zwei verschiedenfarbige Lichtquellen in Bezug auf ihre Helligkeit für das Auge vollkommen inkommensurabel.

Einen interessanten Beleg hierfür liefern die Messungen, welche Fraunhofer vornahm,[6] um die Intensitätscurve des Sonnenspektrums festzustellen. Er verglich

[1] Goethe, Farbenlehre 767.

[2] ibid. 778.

[3] Newton Optics Book 1 Prop. VII, Theor. VI, p. 85, 1717.

[4] Helmholtz, Physiologische Optik, § 21.

[5] Centralztg. f. Optik und Mech. 1881, No. 3.

[6] a. a. O.

die Helligkeit der einzelnen Theile des Spektrums mit der Helligkeit einer kleinen Oellampe. Vor Kurzem hat Dietrich[1] die mittleren Fehler einer Beobachtung Fraunhofer's in Procenten der Lichtstärke des betreffenden Ortes des Spektrums berechnet und dafür gefunden:

B	C	D	E	F	G	H
62 %	45	9	20	43	58	61

Das Urtheil ist also bei D am sichersten, da das homogene Gelb am meisten dem nicht homogenen Lichte der Lampe glich, bei Vergleichung des Normallichtes mit den anderen Farben aber ausserordentlich unsicher.

Es erklärt sich uns nun auch der Umstand, welcher von Allen, die photometrische Messungen gemacht haben, hervorgehoben wird: dass die Vergleichung der Helligkeiten zweier verschieden gefärbter Lichtquellen Schwierigkeiten bietet; dieses macht sich bereits geltend bei Vergleichung der Helligkeit des Gaslichtes mit derjenigen einer Normalkerze.

In noch erheblicherem Masse tritt diese Schwierigkeit auf bei Bestimmung der Helligkeit des elektrischen Lichtes nach derjenigen einer Normalkerze oder eines Normalöl- (Carcel-) brenners, denn die spektrale Zusammensetzung der beiden hier zur Vergleichung kommenden Lichtquellen ist eine sehr verschiedene.

O. E. Meyer[2] verglich die Helligkeiten des Sonnen-, des elektrischen und des Gaslichtes in den verschiedenen Theilen des Spektrums mit einander und fand, wenn man die Helligkeit des elektrischen Lichtes = 1 setzt, die Helligkeit des Gaslichtes

im Roth = 1,09
» Gelb = 1,00
» Grün = 0,43
» Blau = 0,27
» Violett = 0,15.

Nimmt man die Helligkeit der Sonne = 1 an, so ist das elektrische Licht

im Roth = 2,90
» Gelb = 1,00
» Grün = 0,99
» Blau = 0,87
» Violett = 1,03.

Aus dieser Zusammensetzung erklärt es sich, dass wenn elektrisches und Gaslicht neben einander gesehen werden, das erste bläulich weiss, das letztere roth erscheint, dagegen erschien O. E. Meyer das elektrische Licht gegen die Sonnenbeleuchtung »gelb wie eine hellgefärbte Apfelsine.«

Die Schwierigkeit der Messung der Helligkeit des elektrischen Lichtes ist von denjenigen, welche auf diesem Gebiete arbeiten, auch längst erkannt worden. Perry[3]

---

[1] a. a. O., p. 4.

[2] Ztschrft. f. Angew. Elektr.-Lehre 1879, p. 320.

[3] Die zukünftige Entwickelung der Elektrotechnik, Deutsch von Weinhold. Anm. 17. Leipzig 1882.

sagt: »Weil das elektrische Licht weisser, d. i. reicher an brechbareren Strahlen ist, als das Licht einer Kerze oder Lampe, so ist nicht seine Leuchtkraft als Ganzes mit derjenigen der Normalflamme direct vergleichbar, sondern nur die Lichtstärke für bestimmte Farben.«

Als die einzige Methode, das richtige Verhältniss der Helligkeiten zweier verschieden farbiger Lichtquellen zu einander zu erhalten, ergiebt sich demgemäss die spektrophotometrische. Man stellt bei derselben von jeder Lichtquelle ein Spektrum her der Art, dass beide Spektren durch ein und dasselbe Prisma erzeugt werden und dass beide Spektren dicht an einander grenzen, so dass die Strahlen gleicher Wellenlänge in beiden Spektren übereinander liegen, wie solches durch die von Vierordt, Glan u. A. angegebenen Spektrophotometer erreicht wird. Dann theilt man die Spektren senkrecht zu ihrer Trennungslinie in eine möglichst grosse Anzahl schmaler Streifen. Ein solcher Streifen enthält fast homogenes Licht, die Helligkeit desselben in beiden Spektren wird gleich gemacht durch Veränderung der Breite des Eintrittsspaltes, oder durch Polarisation, oder durch Veränderung der Entfernung der Lichtquellen und hieraus das Verhältniss der Helligkeiten beider Lichtquellen zu einander in dem vorliegenden Spektralbezirk bestimmt. Auf diese Weise fortschreitend würde ermittelt werden das Verhältniss der Helligkeiten in den einzelnen Theilen des Spektrums, mehr aber auch nicht, denn eine Addition der erlangten Resultate über das ganze Spektrum würde keineswegs das Verhältniss der Gesammthelligkeiten beider Lichtquellen ergeben, eine solche Addition ist nicht einmal zulässig, da die Grösse der einzelnen Summanden in verschiedenen uns aber unbekannten Einheiten ausgedrückt ist, wie wir solches bereits oben zeigten.

Man könnte versucht sein zu hoffen, dass die Untersuchungen über die Schärfe des Farbensinnes, welche von Donders,[1] Dor[2] und Grossmann[3] angestellt wurden, hierüber weiteren Aufschluss geben werden. Diese drei Forscher bestimmten die Grössen, welche verschiedenfarbige Flächen haben müssen, um in einer bestimmten Entfernung noch als farbig erkannt werden zu können und fanden, dass das Unterscheidungsvermögen für die verschiedenen Farben sehr verschieden sei. Ganz abgesehen davon, dass hierbei die Sehschärfe des Beobachters eine Rolle spielen muss, liefern diefe Untersuchungen doch nur Aufklärung über die Grenzwerthe der Empfindlichkeit des Auges für verschiedene Farben, nicht über die Einheiten der Empfindungsstärke selbst.

Abgefehen davon, dass die spektrophotometrische Methode wohl ausführbar ist im Laboratorium zu wissenschaftlichen Zwecken, sich aber als viel zu umständlich und zeitraubend erweist, wenn es sich um praktische Bestimmungen der Helligkeit des elektrischen Lichtes handelt, ganz abgesehen von diesem Umstande, welcher allein schon ihre praktische Anwendung ausschliessen würde, bietet also diese

[1] Archiv für Ophthalmologie XXIII, 4, p. 182.

[2] Echelle pour mesurer l'Acuité de la Vision Chromatique. Paris 1878.

[3] Ueber die Messung der Schärfe des Farbensinnes, Inaug.-Diss. Greifswald 1880.

Methode auch nur die Möglichkeit der Vergleichung der Helligkeiten einzelner Farben ohne einen Schluss auf die Gesammthelligkeit zu erlauben.

Da lag es nahe, dass man sich mit der Vergleichung der Helligkeit einzelner Farben begnügen wollte bei der Bestimmung der Helligkeit des elektrischen Lichtes nach derjenigen einer Normalflamme. So schlug A. Crova[1] vor, den grünen Theil des Spektrums hierzu zu benutzen und construirte zu diesem Zwecke ein Photometer, bei welchem alle Strahlen mit Ausnahme der grünen ausgeschlossen werden. Wenn nämlich die Gesammthelligkeit eines Carcelbrenners gleich derjenigen des elektrischen gemacht wird (durch Abschwächen des letzteren) so sind die Helligkeiten beider im Gelbgrün einander gleich, während sie im Roth und im Violett beträchtlich von einander abweichen, wie die oben mitgetheilten Versuchsresultate von O. E. Meyer zeigen. Diese Methode hat also etwas für sich, es scheint uns jedoch die Grundlage derselben noch nicht so ganz sicher zu sein, da die Behauptung über dies Verhältniss der spektralen Zusammensetzung der beiden mit einander zu vergleichenden Lichtquellen auf der vorherigen absoluten Gleichmachung ihrer Gesammtintensitäten beruht und das ist ja gerade die schwierige Aufgabe, deren Lösung erst gefunden werden soll. Ausserdem wird es hierbei sehr darauf ankommen, den richtigen Spektralbezirk zur Messung auszuwählen.

Perry[2] schlägt den Ausweg vor, anstatt die Messungen über das ganze Spektrum auszudehnen, nur zwei Farben aus demselben herauszugreifen. Er vergleicht die beiden Lichtquellen zuerst durch ein rothes Glas, hierauf durch ein grünes und combinirt dann die beiden erhaltenen und von einander abweichenden Messungsresultate zu einem Mittelwerthe. Auch hier kommt man aber nicht über die Schwierigkeit hinweg, welche durch die verschiedene Werthigkeit der Resultate der Vergleichung der rothen Strahlen und derjenigen der grünen entspringt.

Hauptsächlich bei den in letzter Zeit so oft an den Praktiker herantretenden Bestimmungen der Helligkeit des elektrischen Lichtes wäre vielleicht eine andere Methode der Vergleichung die zweckentsprechendste, bei welcher nicht direct die Lichtquellen mit einander verglichen werden, sondern ihr Beleuchtungseffekt, denn auf diesen kommt es doch bei allen praktischen Anlagen an, zumal wenn es sich darum handelt, die eine Beleuchtungsart (Gas) durch die andere (elektrisches Licht) zu ersetzen. Wir kommen dadurch auf den schon von manchen Seiten gemachten Vorschlag, zu diesem Zwecke Erkennungsproben zu benutzen, d. h. die Wirkung zweier Lichtquellen in der Weise mit einander zu vergleichen, dass man untersucht, in welcher Entfernung etwa feine Details einer Zeichnung noch erkannt oder feine Schriften noch gelesen werden können.

Siemens[3] sagt: »Ein richtiges Photometer sollte verschiedenartiges Licht dann als gleich angeben, wenn es uns in gleicher Weise entfernte Objekte erkennbar macht.«

---

[1] Comptes rendus XCIII, p. 512.

[2] a. a. O.

[3] Wied. Ann. 2, p. 547, 1877.

Bergé[1] betrachtet als Mass der Intensität die Entfernung, in welcher man die Lichtquelle anbringen muss, damit man die Beleuchtung einer dem zerstreuten Lichte ausgesetzten weissen Tafel durch eine Schicht einer Kupfer-Ammonium-Lösung von gegebener Dicke gerade bemerken kann. Abgesehen davon, dass das zu Grunde liegende Mass wenig präcis gestellt ist, ist natürlich die Einschaltung einer farbigen Lösung, d. h. die Beschränkung der Vergleichung der Helligkeit der von diesen durchgelassenen Strahlen anstatt der Gesammtintensität unzulässig. Crompton[2] versucht bei der Frage der praktischen Beleuchtung mit elektrischem Licht die Grundflächen zu bestimmen, welche in drei verschiedenen Helligkeitsgraden erleuchtet werden. Der erste Helligkeitsgrad ist so gewählt, dass man bei ihm jede feinere Arbeit verrichten kann, beim zweiten Helligkeitsgrade kann eine Zeitung überall bequem gelesen werden; bei dem dritten Helligkeitsgrade sind die entferntesten Punkte der zu beleuchtenden Bodenfläche ebenso stark beleuchtet wie bei intensivem Mondschein. Ebenso wurden bei praktischen Versuchen mit elektrischem Lichte, welche in Rouen angestellt wurden, zur Beurtheilung der Wirkung desselben der Radius des Wirkungskreises bestimmt und der letztere so definirt, dass die Beleuchtung am Umfange desselben gleich der Helligkeit eines in 3,5 Meter befindlichen Carcelbrenners sein sollte.[3]

Auf ähnlicher Grundlage ruht das Hänlein'sche Photometer,[4] bei welchem ein auf einer Milchglasscheibe angebrachter schwarzer Strich durch die zu prüfende Lichtquelle beleuchtet und dann durch Einschalten absorbirender Flüssigkeiten das Licht so weit abgeschwächt wird, bis der Strich nicht mehr gesehen werden kann.

Bei allen diesen Methoden wird die Schwierigkeit eintreten, dass es schwer zu constatiren ist, bei welcher schwachen Beleuchtung man ein Object gerade noch sieht oder es eben nicht mehr sieht. Nach längerem Verweilen in der Dunkelheit nimmt das Auge wieder Details wahr, welche ihm schon verschwunden waren, es tritt dadurch ein ziemlich weiter Spielraum ein bei Bestimmung der Sichtbarkeitsgrenze. —

Die Resultate der Vergleiche zwischen den spektralen Zusammensetzungen verschiedener Lichtquellen wie Gaslicht, elektrisches Licht und Sonnenlicht (siehe O. E. Meyer) weifen darauf hin, dass eine Lichtquelle je intensiver sie wird, eine verhältnissmässig um so grössere Helligkeit in brechbarerem Theile des Spektrums zeigt und eine um so kleinere in weniger brechbarem Theile. Eine nach den oben dargelegten Principien durchgeführte spektrophotometrische Vergleichung zweier Lichtquellen würde also vielleicht einen Schluss auf ihr Helligkeitsverhältniss gestatten. Es dürfte aber schwierig sein, Normen aufzustellen, nach denen ziffermässige Ausdrücke für dieses Helligkeitsverhältniss gefunden werden können. Selbstverständlich wären bei Untersuchungen nach dieser Methode nur Lichtquellen hinzuzulassen, welche auf Glühen resp. Verbrennung eines und desselben Körpers, also etwa der Kohle, beruhen, jeder die

---

[1] Verhandlungen des Congresses der Elektriker. Paris 1881, p. 333.

[2] Die elektrische Beleuchtung für industrielle Zwecke: deutsch von Uppenborn 1881.

[3] Bull. de la Soc. industr. de Rouen 1881, p. 87.

[4] Journ. f. Gasbeleuchtung 1881, p. 659.

Flamme färbende Zusatz (z. B. von Natrium) würde die Methode sofort unbrauchbar machen.

Die kurze Besprechung der in letzterer Zeit in Vorschlag gebrachten photometrischen Methoden, so weit sie solche sind, d. h. so weit sie auf Benutzung des menschlichen Auges beruhen, zeigt, dass es kein praktisches Verfahren giebt, welches die theoretische Schwierigkeit der Vergleichung zweier verschiedenfarbigen Lichter in Bezug auf ihre Helligkeit ganz vermeidet. Wenn dieses also doch von keiner der neuen Methoden geleistet wird, dann bleibt man wohl am besten bei dem bisher meist benutzten altbewährten Bunsen'schen Photometer, bei welchem sich die Anbringung einer Dispersionslinse nach Perry und Ayrton[1] als sehr praktisch empfiehlt.

Wir kennen die Schwierigkeiten, welche durch die Natur unseres Sehorgans uns in den Weg treten, sie können aber etwas gemindert werden dadurch, dass man nicht Lichtquellen von allzu verschiedener Helligkeit mit einander vergleicht, welche im Allgemeinen eine sehr von einander verschiedene spektrale Zusammensetzung haben. Man vergleiche also nicht die Helligkeit eines elektrischen Lichtes direct mit derjenigen einer Kerze, sondern steige allmählig an von der Kerze zum Carcelbrenner oder Gasbrenner, weiter zu elektrischem Licht von geringer Intensität (Incandescenzlampen) und schreite endlich zum helleren und hellsten elektrischen Bogenlicht fort.

[1] Phil. Mag. (5) 8, p. 117, 1880.